

## اثر رنگدانه‌های طبیعی بر عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای

مهدي شهيدی زندی<sup>۱\*</sup>، قاسم گلستانی<sup>۲</sup> و محمدرضا غلامحسین‌زاده<sup>۳</sup>

۱- استادیار شیمی فیزیک، دانشکده علوم، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران  
۲- کارشناس ارشد شیمی آلی، دانشکده علوم، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران  
۳- دانشجوی دکتری شیمی فیزیک، دانشکده علوم، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

دریافت: خرداد ۱۳۹۶، بازنگری: تیر ۱۳۹۶، پذیرش: شهریور ۱۳۹۶

**چکیده:** در این پژوهش از سه عصاره طبیعی آب انار، چای قرمز و چای سبز به عنوان رنگدانه در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای استفاده شد. ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی ساخته شده از این سه رنگدانه طبیعی با استفاده از اندازه‌گیری‌های فتوولتایی و روش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. از یک سلول خورشیدی ساخته شده از رنگدانه روتنیم (N719)، به‌عنوان یک رنگدانه استاندارد، برای مقایسه استفاده شد. سلول‌های خورشیدی از دو صفحه‌ی شیشه‌ای پوشیده شده با اکسید رسانای شفاف (الکترودهای آند و کاتد) تهیه شدند. لایه‌ی نازک آند با استفاده از نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید و به روش دکتر بلید بر روی صفحه شیشه‌ای رسانا ساخته شد. الکتروکاتد با کاتالیست پلاتین پوشش داده شد. مقایسه این رنگدانه‌ها با ۲۹ رنگدانه که توسط دیگر پژوهشگران بررسی شده‌اند نشان داده است که رنگدانه چای قرمز می‌تواند به‌عنوان یک رنگدانه مناسب برای سلول‌های خورشیدی به کار رود. سلول خورشیدی محتوی رنگدانه چای قرمز، ضریب پرتشدگی ۰/۴۲ و بازده ۱/۰۲٪ را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** سلول خورشیدی رنگدانه‌ای، رنگدانه طبیعی، طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی، عصاره چای قرمز

### مقدمه

زیستی کامل، رنگ‌های طبیعی موضوع مورد توجه در بیشتر پژوهش‌ها بوده است [۳ تا ۶]. در این مقاله، سلول‌های خورشیدی تهیه شده با رنگ‌های طبیعی گرفته شده از آب انار، چای قرمز و چای سبز با استفاده از نمودارهای جریان - پتانسیل (I-V) و روش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی<sup>۲</sup> (EIS) بررسی و بازده آن‌ها با یکدیگر و با رنگ استاندارد N719 مقایسه شده است. همچنین، نتایج این کار با چند کار پژوهشی قبلی بر روی رنگ‌های طبیعی مقایسه شده است.

گرتزل<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۱ موفق شدند با ترکیب الکترودهای نانو ساختار و رنگ‌های تزریق کننده‌ی بار، نخستین سلول خورشیدی رنگدانه‌ای را تهیه کنند [۱]. با توجه به هزینه‌ی پایین، عدم پیچیدگی ساختاری، بازده خوب و پایداری طولانی مدت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، پژوهش‌ها در این فناوری به سرعت در طول دو دهه‌ی اخیر پیشرفت کرده است [۲]. استفاده از رنگ‌های طبیعی هزینه‌ی ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای را پایین می‌آورد. با توجه به هزینه‌ی کم، غیر سمی بودن و تجزیه

1. Gratzel

2. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

## بخش تجربی

مواد مورد استفاده که شامل شیشه رسانای شفاف پوشش داده شده با قلع دی‌اکسید آلیبده شده با فلئور<sup>۲</sup> (FTO)،  $\text{TiO}_2$ ، محلول پلاتین و رنگ استاندارد N719 هستند از شرکت شریف سولار تهیه شدند.

اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه پتانسیوستات مدل N302 ساخت شرکت AUTOLAB محصول کشور هلند مجهز به کیت نوری (Autolab LED driver kit) و منبع تابش با چگالی توان کل  $100 \text{ mW/cm}^2$  (AM1.5) انجام شد. نمودارهای جریان-پتانسیل (I-V) و منحنی‌های نایکوئیست و بُد-فاز با استفاده از نرم‌افزار Nova 1.11 به دست آمده‌اند. برای تهیه طیف‌های جذبی مرئی-فرابنفش از دستگاه طیف‌نگار مرئی-فرابنفش مدل Perkin Elmer استفاده شد.

برای تهیه الکترودهای آند و کاتد از شیشه‌های رسانای FTO به عنوان بستر رسانای شفاف استفاده شد. برای شستشوی شیشه FTO، ابتدا با آب و صابون به مدت ۶ دقیقه در حمام فراصوت قرار داده شد. سپس با محلول ۰/۱ مولار HCl در اتانول به مدت ۶ دقیقه در و پس از آن با اتانول به مدت ۶ دقیقه در حمام فراصوت قرار داده شد. این شیشه FTO در انتها با آب بدون یون و اتانول شسته شد.

برای آماده‌سازی آند، ابتدا خمیر  $\text{TiO}_2$  به روش دکتر بلید با استفاده از نوار چسب بر روی شیشه لایه‌نشانی شد. لایه در دمای  $125^\circ\text{C}$  به مدت ۶ دقیقه خشک و پس از سرد شدن، لایه دوم روی آن نشاند و سپس خشک شد. پس از نشاندن لایه سوم و خشک کردن آن در دمای  $125^\circ\text{C}$ ، نوار چسب جدا و تف‌جوش شد. در این صورت پس از تف‌جوشی، ضخامت لایه  $\text{TiO}_2$  برابر ۱۲ میکرومتر شد. برای تف‌جوشی، لایه تا دمای  $500^\circ\text{C}$  گرم داده شد. گرمادهی به صورت زیر انجام شد:

گرمادهی در دماهای  $325^\circ\text{C}$  و  $375^\circ\text{C}$  در هر دما به مدت ۵ دقیقه و در دماهای  $450^\circ\text{C}$  و  $500^\circ\text{C}$  در هر دما به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. پس از پایان این مراحل، لایه باید به آرامی سرد می‌شد

زیرا تغییر دمای سریع می‌تواند باعث ترک خوردن و جدا شدن لایه شود. بعد از اتمام تف‌جوشی و سرد شدن لایه، با استفاده از یک لامل، اطراف لایه را تراشیده، تا مساحت آن مساوی ۰/۲۸ سانتیمتر مربع شود.

برای تهیه عصاره‌ی رنگ طبیعی، ۲ گرم از ماده‌ی مورد نظر (چای سبز، چای قرمز و یا دانه انار) در یک بشر کوچک ریخته و پس از افزودن ۵ ml اتانول به آن، با یک میله شیشه‌ای خوب هم‌زده شد. پس از گذشت حدود ۲ ساعت و سپس هم‌زدن، محلول با کاغذ صافی صاف شد و مورد استفاده قرار گرفت. به منظور جذب رنگ بر روی لایه‌ی  $\text{TiO}_2$ ، شیشه FTO تف‌جوشی شده در عصاره‌ی رنگ طبیعی قرار داده و به مدت ۲۰ ساعت نگاه‌داشته شد. شکل ۱ نشان دهنده‌ی آندهای به دست آمده پس از جذب رنگدانه است.

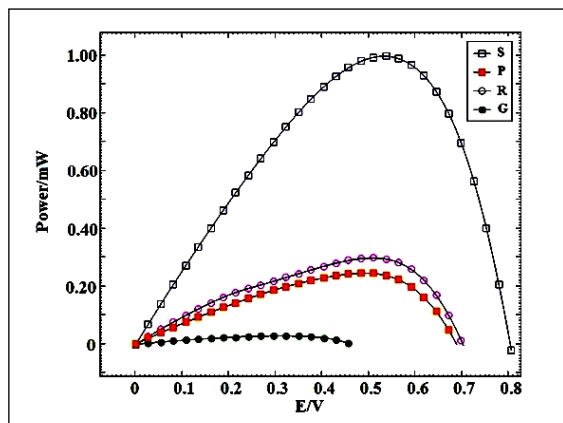


شکل ۱ الکترودهای آند پس از لایه‌نشانی  $\text{TiO}_2$  و جذب رنگدانه روی آن.

برای آماده‌سازی الکتروکاتد، باید لایه‌نشانی پلاتین روی آن انجام شود. برای این کار پس از پایان مراحل شستشو، کاتد به مدت ۱۵ دقیقه در دمای  $460^\circ\text{C}$  گرمادهی شد. سپس دما به آرامی پایین آورده شد تا FTO ترک نخورد. هنگامی که FTO به طور کامل خنک شد، یک قطره از محلول پلاتین روی سطح آن ریخته شد. وقتی پلاتین همه سطح را پوشاند، آن را در دمای  $460^\circ\text{C}$  به مدت ۱۵ دقیقه گرم داده و به آرامی سرد شد. الکترولیت مورد استفاده تشکیل شده از یک محلول 0.5M  $\text{KI} + 0.05\text{M I}_2$  که در حلال اتیلن گلیکول و استونیتریل با نسبت حجمی ۴ به ۱ تهیه شده است [۶].

### 3. Fluorine-doped tin oxide (FTO)

را که رنگدانه‌های متفاوت دارند، نشان می‌دهند. توان به‌دست آمده از سلول خورشیدی از معادله  $P=IV$  محاسبه می‌شود. توان در نقاط  $I_{sc}$  و  $V_{oc}$  صفر است زیرا در نقطه  $I_{sc}$  مقدار ولتاژ صفر بوده و در نقطه  $V_{oc}$  مقدار جریان مساوی صفر است. بیشینه توان در نقطه‌ای بین این دو نقطه قرار می‌گیرد.



شکل ۳ نمودارهای توان برای سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای دارای رنگدانه‌های متفاوت (S): رنگدانه استاندارد، P: آب انار، R: چای قرمز و G: چای سبز).

ضریب پرشدگی<sup>۲</sup>،  $FF$ ، که معیاری از کیفیت سلول خورشیدی است از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$FF = \frac{P_{max}}{P_T} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}}$$

ضریب پرشدگی در واقع نسبت توان بیشینه به توان نظری است.

بازده<sup>۳</sup>،  $\eta$ ، عبارت است از نسبت بیشینه توان الکتریکی خروجی به توان تابشی ورودی در یک سلول خورشیدی:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100$$

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100$$

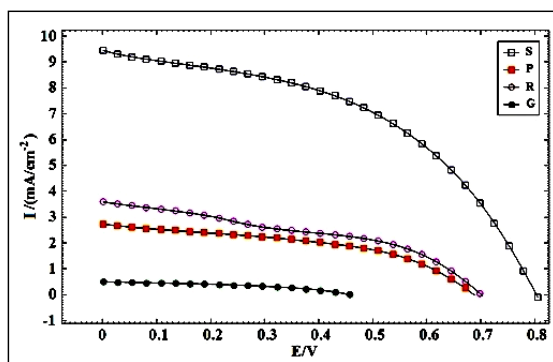
جدول ۱ مقادیر کمیت‌های به‌دست آمده از نمودارهای  $J$  جریان - پتانسیل را فهرست کرده است. این کمیت‌ها نشانگر عملکرد سلول خورشیدی در حضور رنگدانه‌های متفاوت هستند. مشاهده

برای بستن سلول، ابتدا روی یک لایه بسیار موسوم به پارافیلیم<sup>۱</sup>، سوراخی به مساحت  $0.28 \text{ cm}^2$  ایجاد و سپس روی سطح FTO که با  $\text{TiO}_2$  لایه‌نشانی شده بود (آند)، گذاشته شد. سپس یک قطره الکترولیت روی پوشش  $\text{TiO}_2$  ریخته و کاتد روی آن قرار داده شد. سلول آماده شده با کمک گیره، محکم شد. مساحت سلول به‌دست آمده  $0.28 \text{ cm}^2$  بود.

## نتیجه‌ها و بحث

عملکرد رنگ‌های طبیعی با اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ضریب پرشدگی و بازده، مورد بررسی قرار گرفت. رنگ استاندارد N719 نیز به منظور مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های قبلی مورد آزمایش واقع شد.

شکل ۲ نشان‌دهنده نمودار چگالی جریان - پتانسیل (I-V) مربوط به سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای است که در حضور رنگدانه‌های متفاوت یعنی رنگدانه استاندارد N719 (S)، آب انار (P)، چای قرمز (R) و چای سبز (G) به‌دست آمده‌اند. این نمودارها با روبش پتانسیل اعمال شده به آند سلول خورشیدی از صفر تا  $V_{oc}$  در هنگامی که سلول خورشیدی تحت تابش نور استاندارد AM1.5 است، به‌دست آمده‌اند.



شکل ۲ نمودارهای چگالی جریان - پتانسیل برای سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای دارای رنگدانه‌های متفاوت (S): رنگدانه استاندارد، P: آب انار، R: چای قرمز و G: چای سبز).

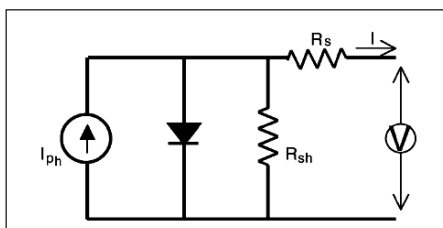
شکل ۳ نمودارهای توان به‌دست آمده از سلول‌های خورشیدی

1. Parafilm

2. Fill factor

3. Efficiency

که مربوط به غلاف منگوستین هندی<sup>۱</sup> است نسبت به رنگدانه استاندارد (۶/۱۱) سنجیده شود، عدد ۰/۲ به دست می‌آید. این به آن معنی است که بهترین رنگدانه طبیعی در بین ۲۰ رنگدانه مورد بررسی، ۲۰٪ بازده سلول خورشیدی رنگدانه استاندارد را دارد. حال با توجه به جدول ۱، مشخص می‌شود که رنگدانه آب انار ۲۴٪، چای قرمز ۲۹٪ و چای سبز ۳٪ بازده رنگدانه استاندارد را دارند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که از بین سه رنگدانه مورد بررسی دو رنگدانه چای قرمز و آب انار بازده خوبی را دارند. از این رو، می‌توان ویژگی‌های الکتریکی سلول‌های خورشیدی را با یک مدار معادل همانند آنچه در شکل ۴ نشان داده شده تجزیه و تحلیل کرد [۱۰]. اگر این مدار را برای بررسی یک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به کار ببریم می‌توان گفت که دو مقاومت یکی موازی، R<sub>SH</sub>، و دیگری سری، R<sub>S</sub>، تأثیر به‌سزایی بر کارکرد سلول خورشیدی دارند. برای یک سلول خورشیدی ایده‌آل مقدار مقاومت موازی بی‌نهایت باشد مسیری موازی برای عبور جریان فراهم نکند و مقدار مقاومت سری باید صفر باشد تا هیچ‌گونه افت پتانسیلی را سبب نشود.



شکل ۴ مدار معادل برای سلول‌های خورشیدی با اتصال p-n [۱۰]

می‌توان مقادیر مقاومت سری و مقاومت موازی را از شیب نمودار جریان - پتانسیل به ترتیب در Voc و Isc به دست آورد (شکل ۵). این مقادیر در جدول ۲ فهرست شده‌اند. بنابراین، هر چه شیب نمودار جریان - پتانسیل در Voc بیشتر باشد مقدار مقاومت سری کوچکتر بوده و مقدار Isc افزایش می‌یابد. بر این اساس با توجه به شکل ۲، نمودار مربوط به رنگدانه استاندارد، کمترین مقدار مقاومت سری و در نتیجه بیشترین مقدار جریان اتصال کوتاه را دارد.

می‌شود که بیشترین بازده مربوط به رنگدانه استاندارد بوده و از بین رنگدانه‌های طبیعی مورد بررسی، رنگدانه چای قرمز، بازده بیشتری نشان می‌دهد. کمترین بازده مربوط به چای سبز است.

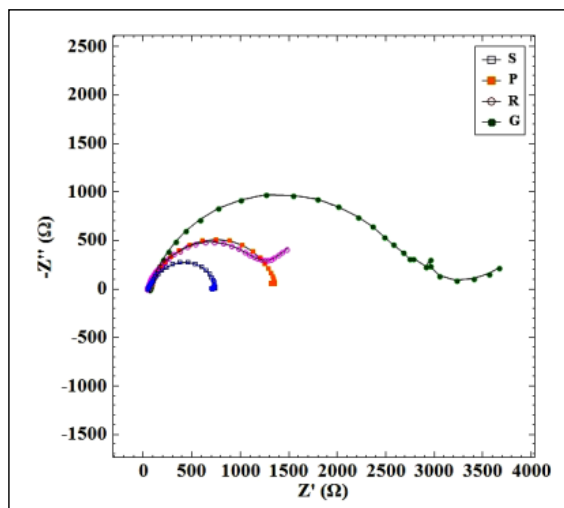
جدول ۱ کمیت‌های مربوط به عملکرد سلول خورشیدی با رنگدانه‌های متفاوت

رنگدانه	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	ضریب پرشدهی (%)	بازده
S	۹٫۵	۰٫۸۰	۰٫۴۷	۳٫۵
P	۲٫۷	۰٫۶۹	۰٫۴۷	۰٫۸۴
R	۳٫۶	۰٫۷۰	۰٫۴۲	۱٫۰۲
G	۰٫۵۲	۰٫۴۶	۰٫۴۳	۰٫۱۰

آنچه در نگاه اول جلب توجه می‌کند پایین بودن بازده سلول خورشیدی محتوی رنگدانه استاندارد است که به‌طور معمول در مقالات متفاوت تا ۶/۱۱ درصد گزارش شده است [۷]. اما باید توجه داشت که ضخامت لایه اکسید، نوع الکترولیت و همچنین حلال مورد استفاده تأثیر زیادی بر بازده سلول خورشیدی رنگدانه‌ای می‌گذارند [۸]. از جمله مشخص شده که الکترولیت LiI در مقایسه با KI کارایی بسیار بهتری را برای سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به ارمغان می‌آورد. از آنجا که در این پژوهش از الکترولیت KI استفاده شده انتظار کاهش بازده داریم. اما آنچه مهم است این که تمام این رنگدانه‌ها در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گرفته و می‌توان آن‌ها را با یکدیگر از نظر تأثیر بر کارایی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای مورد مقایسه قرار داد.

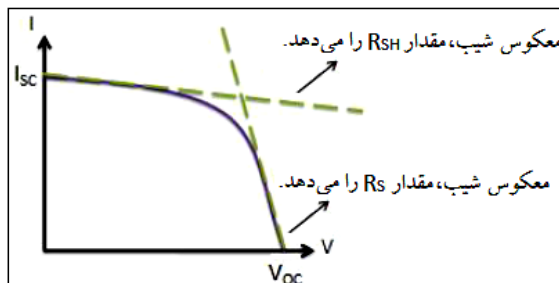
اگر در مقام مقایسه این مقادیر بازده با مقادیر به دست می‌آیند از کارهای قبلی بر روی رنگدانه‌های طبیعی باشیم می‌توان مقاله‌ای که ۲۰ رنگدانه طبیعی را بررسی کرده مد نظر قرار دهیم [۷]. این مقاله مقادیر بازده رنگدانه‌های متفاوت را از ۰/۰۳ تا ۱/۱۷ درصد به دست آورده به طوری که اکثر نتایج در حدود ۰/۳۰٪ هستند. در همین شرایط، بازده سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با رنگدانه NV۱۹ را ۶/۱۱ درصد گزارش شده است. اگر بیشترین مقدار بازده (۱/۱۷)

به‌طور کلی نمودار نایکوئیست به‌دست آمده از یک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای دارای سه نیم‌دایره است: اولی یک نیم‌دایره کوچک در فرکانس‌های بالا (بالتر از  $10^3$  هرتز) مربوط به انتقال بار در سطح مشترک Pt، الکترولیت، دومی یک نیم‌دایره بزرگ در فرکانس‌های متوسط (حدود ۱۰ هرتز) مربوط به انتقال بار در سطح مشترک  $TiO_2$  رنگ، الکترولیت و سومی یک نیم‌دایره کوچک (در فرکانس کمتر از ۱ هرتز) مربوط به نفوذ یون‌های تری‌یدید ( $I_3^-$ ) در درون الکترولیت [۱۱]. به علت وجود مقدار زیاد یون یدید در مقایسه با یون تری‌یدید از یک طرف و یکسان بودن ضریب نفوذ این دو از طرف دیگر، تنها یون‌های تری‌یدید در این امپدانس نفوذ تاثیر دارند [۱۲].



شکل ۶ نمودارهای نایکوئیست برای سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای دارای رنگدانه‌های متفاوت (S: رنگدانه استاندارد، P: آب انار، R: چای قرمز و G: چای سبز)

مدار معادل مورد استفاده برای برازش داده‌های امپدانس در شکل ۷ نشان داده شده است. در این مدار منظور از Q مقدار عنصر فاز ثابت<sup>۱</sup> است. امپدانس واربرگ نیز مربوط به نفوذ یون‌های تری‌یدید ( $I_3^-$ ) در درون الکترولیت است. مقاومت RS مربوط به شیشه‌های رسانا بوده، Ra و Qa مربوط به سطح مشترک



شکل ۵ مقاومت‌های سری و موازی به‌دست آمده از نمودار جریان - پتانسیل

جدول ۲ مقادیر مقاومت‌های سری و موازی

بازده	ضریب پرشدگی (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	رنگدانه
۳٫۵	۰٫۴۷	۰٫۸۰	۹٫۵	S
۰٫۸۴	۰٫۴۷	۰٫۶۹	۲٫۷	P
۱٫۰۲	۰٫۴۲	۰٫۷۰	۳٫۶	R
۰٫۱۰	۰٫۴۳	۰٫۴۶	۰٫۵۲	G

اهمیت مقاومت سری برای بررسی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بیشتر از مقاومت موازی است زیرا مقاومت سری هم بر مقدار  $V_{oc}$  و هم بر مقدار  $I_{sc}$  تأثیر دارد، اما مقاومت موازی تنها تأثیر ناچیزی بر  $I_{sc}$  داشته و بر مقدار  $V_{oc}$  تأثیری ندارد زیرا ولتاژ دو سر مقاومت‌های موازی، یکسان است. هر چه مقدار مقاومت سری بیشتر باشد، افت پتانسیل بیشتری ایجاد شده و در نتیجه مقدار  $V_{oc}$  کمتر می‌شود. افزایش مقدار مقاومت سری در این رنگدانه‌های طبیعی نسبت به رنگ استاندارد (جدول ۲)، سبب کاهش مقدار  $V_{oc}$  در این رنگدانه‌های طبیعی می‌شود. این افزایش مقاومت سری به علت کاهش قدرت بر جذب رنگدانه روی بستر  $TiO_2$  است. این مطلب در بخش آخر بررسی می‌شود.

#### طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

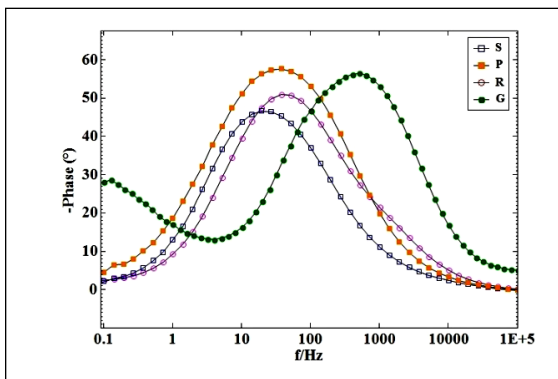
شکل ۶ نمودارهای نایکوئیست به‌دست آمده از سلول‌های خورشیدی محتوی هر یک از چهار رنگدانه را نشان می‌دهد.

1. Constant Phase Element

خورشیدی محتوی هر یک از چهار رنگدانه دیده می‌شوند. با استفاده از این نمودارها می‌توان طول عمر الکترون در لایه  $TiO_2$  یا ثابت زمانی برای بازترکیب را با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_p}$$

که در آن  $\tau$  ثابت زمانی برای بازترکیب<sup>۱</sup> و  $f_p$  فرکانس پیک در نمودار بد-فاز مربوط به نیم‌دایره دوم است.

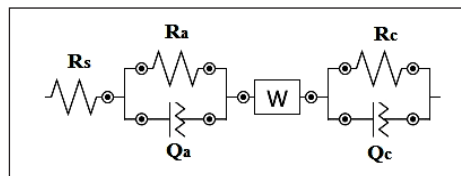


شکل ۸ نمودارهای بد-فاز برای سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای دارای رنگدانه‌های متفاوت (S: رنگدانه استاندارد، P: آب انار، R: چای قرمز و G: چای سبز).

جدول ۳ مقادیر زمان عمر الکترون در تراز رسانش  $TiO_2$  را برای هر رنگدانه نشان می‌دهد. هر چه طول عمر الکترون در تراز رسانش  $TiO_2$  بیشتر باشد نشان دهنده این است که بازترکیب در مرز الکترولیت/فوتوآند با سرعت کمتری اتفاق و در نتیجه Voc افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که کوتاه‌ترین طول عمر مربوط به چای سبز است. این به آن معنی است که بازترکیب در مرز الکترولیت/فوتوآند با سرعت بیشتری اتفاق و در نتیجه Voc کاهش یافته است. همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد رنگدانه چای سبز کمترین Voc را دارد. بیشتر بودن طول عمر الکترون برای دو رنگدانه‌ی چای قرمز و انار نشان دهنده آن است که بازترکیب در مرز الکترولیت/فوتوآند با سرعت کمتری اتفاق افتاده و در نتیجه Voc بیشتر است (جدول ۱).

$TiO_2$ /رنگ/الکترولیت (آند) و Rc و Qc مربوط به سطح مشترک Pt/الکترولیت (کاتد) است. در بررسی نمودارهای نایکوئیست می‌توان گفت که نیم‌دایره‌ی اول به‌دست آمده از ثابت زمانی Rc و Qc بوده و نیم‌دایره‌ی دوم ناشی از ثابت زمانی Ra و Qa است. نیم‌دایره‌های قابل مشاهده در شکل ۶ در واقع نیم‌دایره دوم مربوط به فرکانس‌های متوسط (حدود ۱۰ هرتز) هستند. قطر نیم‌دایره دوم، نشان‌دهنده‌ی مقدار Ra برای رنگدانه‌های استاندارد، چای قرمز، آب انار و چای سبز است (جدول ۳). مشاهده می‌شود که تفاوت عمده‌ی این سه رنگدانه در مقدار Ra است که مربوط به انتقال بار بین  $TiO_2$  و الکترولیت است. از آنجا که چهار سلول خورشیدی مورد بررسی از هر نظر یکسان بوده و فقط از نظر نوع رنگدانه‌ی جذب شده روی سطح  $TiO_2$  تفاوت دارند می‌توان گفت که این رفتار ناشی از حضور رنگدانه‌های متفاوت روی سطح  $TiO_2$  است. در بین این سه رنگدانه، چای سبز بیشترین و چای قرمز کمترین مقدار Ra را دارند. این به معنای آن است که انتقال الکترون از رنگدانه به  $TiO_2$ ، در حضور رنگدانه چای قرمز نسبت به دو رنگدانه دیگر راحت‌تر انجام می‌شود.

برای مقایسه این نتیجه‌گیری با آنچه از بحث مقاومت‌های سری و موازی (شکل ۴) به‌دست آمد می‌توان گفت که مدار معادل امپدانس (شکل ۷) همان نقش مقاومت سری در شکل ۴ را دارد [۳]. از آنجا که از بین عناصر مدار معادل شکل ۷، مقاومت Ra بیشترین تأثیر را با تغییر رنگدانه نشان می‌دهد می‌توان انتظار داشت که روند تغییر مقاومت سری در رنگدانه‌ها با روند تغییر مقاومت Ra یکسان باشد (استاندارد > چای قرمز > آب انار > چای سبز).

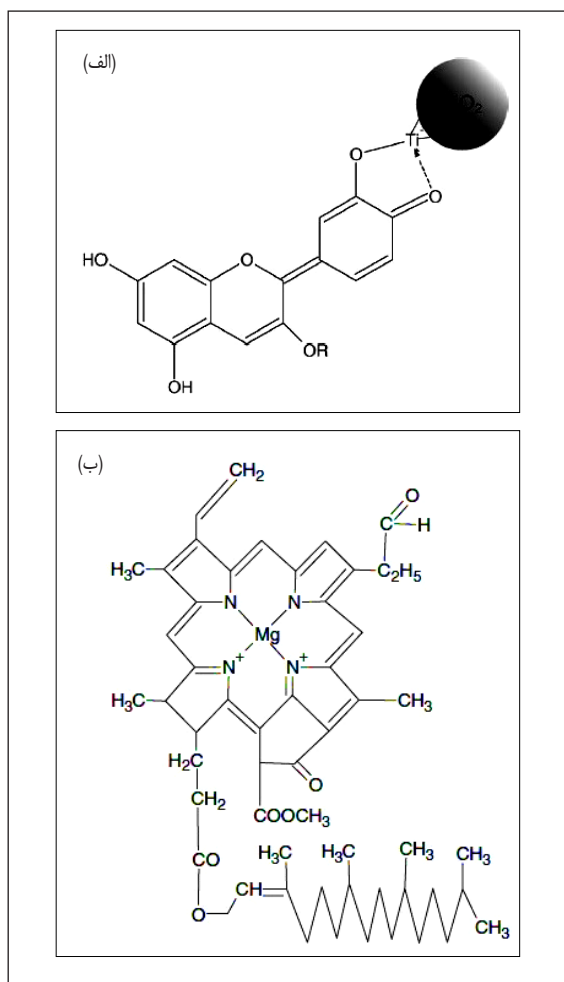


شکل ۷ مدار معادل مورد استفاده برای آنالیز داده‌های امپدانس.

در شکل ۸ نمودارهای بد-فاز به‌دست آمده از سلول‌های

1. Time constant for recombination

و هیدروکسیل در ساختار کلروفیل باعث می‌شود که این رنگدانه، بر خلاف آنتوسیانین، نتواند با فیلم متخلخل  $TiO_2$  پیوند خوبی برقرار کند. افزون بر آن، ممانعت فضایی آلکان زنجیر بلند کلروفیل، مانع از آرایش مؤثر مولکول‌های کلروفیل بر روی لایه  $TiO_2$  می‌شود [۶]. به همین دلایل جذب عصاره چای سبز بر لایه  $TiO_2$  به‌خوبی صورت نگرفته و در نتیجه اثر حساس شدگی لایه  $TiO_2$  کم شده و پایین بودن بازده سلول خورشیدی مربوط را به‌همراه دارد. این نتیجه در توافق با نتایج تجربی این پژوهش است.



شکل ۱۰ (الف) ساختار پایه‌ی آنتوسیانین و پیوند بین مولکول آنتوسیانین با ذرات  $TiO_2$  و (ب) ساختار شیمیایی کلروفیل [۶]

1. Anthocyanin

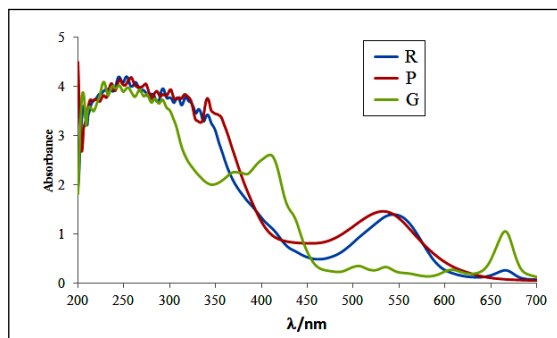
2. Chlorophyll

جدول ۳ مقدارهای مقاومت Ra و ثابت زمانی به‌دست آمده از نتایج امپدانس برای رنگدانه‌های متفاوت

رنگدانه	N719	آب انار	چای قرمز	چای سبز
$R_a/\Omega$	۶۷۰	۱۳۵۰	۱۰۵۰	۲۶۴۰
$f_p/Hz$	۱۹٫۳	۳۷٫۳	۳۷٫۳	۵۰٫۱٫۲
$\tau/ms$	۸٫۲۵	۴٫۲۷	۴٫۲۷	۰٫۳۲

### برجذب رنگدانه‌ها بر بستر $TiO_2$

طیف‌های جذبی مرئی-مابنفش برای محلول هر یک از سه عصاره‌ی چای قرمز، آب انار و چای سبز در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که دو عصاره‌ی چای قرمز و آب انار پیک جذبی به‌تقریب یکسانی را در حدود  $540\text{nm}$  نشان می‌دهند. دلیل این نتیجه، وجود رنگدانه‌ی پایه‌ی آنتوسیانین<sup>۱</sup> در این دو عصاره است [۶]. آنتوسیانین‌ها یک گروه از ترکیبات فنلی طبیعی هستند که ساختار پایه‌ی آن‌ها در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است. به دلیل وجود گروه‌های کربنیل و هیدروکسیل، آنتوسیانین می‌تواند با سطح متخلخل فیلم  $TiO_2$  پیوند پیدا کند. این پیوند، موجب شده است که آنتوسیانین‌ها برای فرایندتبدیل فتوالکتریک گزینه‌ی مناسبی باشد.

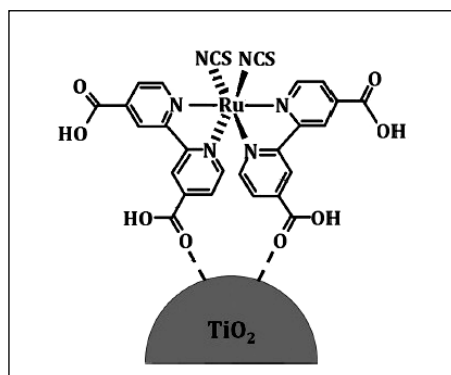


شکل ۹ طیف‌های جذبی برای سه عصاره‌ی طبیعی (R: چای قرمز، P: آب انار و G: چای سبز).

پیک جذبی عصاره‌ی چای سبز در  $666\text{nm}$  مشاهده می‌شود که مربوط به کلروفیل<sup>۲</sup> است [۶]. عدم وجود گروه‌های کربوکسیل

ممانعت فضایی در مولکول رنگدانه است. اما رنگدانه‌های چای قرمز و انار که به دلیل داشتن گروه کربوکسیل امکان برقراری پیوند بهتری با بستر  $\text{TiO}_2$  داشته و بر جذب آن‌ها بهتر است. هر چند که در مقایسه با رنگدانه استاندارد N719 بر جذب خیلی خوبی نشان نمی‌دهند. نتیجه‌گیریدر این پژوهش عملکرد سلول‌های خورشیدی تهیه شده از سه رنگدانه طبیعی آب انار، چای قرمز و چای سبز با استفاده از اندازه‌گیری‌های فتوولتایی و روش طیف‌نگاری امیدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، یک سلول خورشیدی ساخته شده از رنگدانه استاندارد روتنیم (N719)، نیز به منظور مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های قبلی به کار گرفته شد. از مقایسه عملکرد این رنگدانه‌ها با ۲۹ رنگدانه که پیش از این توسط دیگران بررسی شده‌اند مشخص شد که رنگدانه چای قرمز می‌تواند به‌عنوان یک رنگدانه مناسب برای سلول‌های خورشیدی به کار رود. سلول خورشیدی دارای رنگدانه چای قرمز با بازده ۱٫۰۲٪ بهترین عملکرد و سلول دارای چای سبز با بازده ۰٫۱٪ پایین‌ترین عملکرد را نشان داد. دلیل این نتیجه بر جذب بهتر مولکول رنگدانه چای قرمز بر بستر  $\text{TiO}_2$  در مقایسه با مولکول چای سبز است.

ساختار مولکولی رنگدانه N719 (شکل ۱۱) نشان دهنده‌ی وجود گروه‌های کربوکسیل زیاد است که باعث می‌شود این رنگدانه بر جذب بسیار خوبی با بستر  $\text{TiO}_2$  برقرار کند. به محض این که یک فوتون به‌وسیله رنگدانه جذب می‌شود، یک الکترون از فلز مرکزی به حالت  $\pi^*$  لیگاند کربوکسیل منتقل می‌شود. بنابراین، اوربیتال HOMO بر یون Ru و اوربیتال LUMO بر لیگاند کربوکسیل مستقر است. سپس این الکترون تهییج شده در اوربیتال LUMO کربوکسیل به درون نوار رسانش  $\text{TiO}_2$  تزریق می‌شود [۱۴].



شکل ۱۱ ساختار مولکولی N719 و پیوند بین این مولکول با ذرات  $\text{TiO}_2$

بنابراین، می‌توان گفت که بالا بودن مقاومت Ra برای رنگدانه چای سبز (جدول ۳) مربوط به بر جذب نامناسب رنگدانه بر بستر  $\text{TiO}_2$  بر به دلیل عدم وجود گروه کربوکسیل و همچنین، وجود

### سپاسگزاری

از دانشگاه آزاد اسلامی به دلیل تامین بودجه مالی این کار قدردانی می‌شود.

### مراجع

- [1] O'Regan, B.; Gratzel, M.; Nature 353, 737-740, 1991.
- [2] Halme, J.; Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests, Helsinki University of Technology, 2002.
- [3] Shalini, S.; Balasundara prabhu, R.; Prasanna, S.; Mallick, T.K.; Senthilarasu, S.; Renew. Sust. Energ. Rev. 51, 1306-1325, 2015.
- [4] Torchani, A.; Gharbi, R.; Fathallah, M.; Sensors & Transducers 27, 185-189, 2014.
- [5] Torchani, A.; Saadaoui, S.; Gharbi, R.; Fathallah, M.; Current Applied Physics 15, 307-312, 2015.
- [6] Hao, S.; Wu, J.; Huang, Y.; Lin, J.; Sol. Energy 80, 209-214, 2006.



- [7] Zhou, H.; Wu, L.; Gao, Y.; Ma, T.; J. Photoch. Photobio. A 219, 188-194, 2011.
- [8] Wu, J.; Lan, Z.; Hao, S.; Li, P.; Lin, J.; Huang, M.; Fang, L.; Huang, Y.; Pure and Applied Chemistry 80, 2241-2258, 2008.
- [9] Hamadani, M.; Safaei-Ghomi, J.; Hosseinpour, M.; Masoomi, R.; Jabbari, V.; Mat. Sci. Semicon. Proc. 27, 733-739, 2014.
- [10] Koide, N.; Islam, A.; Chiba, Y.; Han, L.; J. Photoch. Photobio. 182, 296-305, 2006.
- [11] Ko, S.-B.; Cho, A.-N.; Kim, M.-J.; Lee, C.-R.; Park, N.-G.; Dyes Pigments 94, 88-98, 2012.
- [12] Kern, R.; Sastrawan, R.; Ferber, J.; Stangl, R.; Luther, J.; Electrochim. Acta 47, 4213-4225, 2002.
- [13] Han, L., Koide, N., Chiba, Y., Mitate, T.; Appl. Phys. Lett. 84, 2433-2435, 2004.
- [14] Sharifi, N.; Tajabadi, F.; Taghavinia, N.; ChemPhysChem 15, 3902-3927, 2014.

## Effect of natural dyes on the performance of dye-sensitized solar cells

M. Shahidi Zandi<sup>1</sup>, Gh. Golestani<sup>2</sup> and M.R. Gholamhosseinzadeh<sup>3</sup>

1. Assistant Prof. of Physical Chemistry, Islamic Azad University-Kerman Branch, Faculty of Science, Kerman, Iran

2. MSc in Organic Chemistry, Islamic Azad University-Kerman Branch, Faculty of Science, Kerman, Iran

3. PhD Student in Physical Chemistry, Islamic Azad University-Kerman Branch, Faculty of Science, Kerman, Iran

Received: June 2017, Revised: July 2017, Accepted: September 2017

**Abstract:** In this research, three natural extracts of pomegranate, red tea, and green tea were used in dye-sensitized solar cell (DSSC). The characteristics of DSSCs made of three natural dyes were investigated by photovoltaic measurements and electrochemical impedance spectroscopy technique. A solar cell fabricated of the ruthenium dye (N719), as a standard dye, was used for comparison. The DSSCs were assembled using two glass plates (anode and cathode) coated with transparent conducting oxide. The anode thin film was prepared on the conductive glass plate using titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles by doctor blade method. The cathode electrode was coated by a catalyst Pt. Comparing these dyes with 29 natural dyes investigated by other researchers revealed that the red tea extract can be used as a reasonable dye in solar cells. The red tea cell showed a fill factor of 0.42 and an efficiency of 1.02%.

**Keywords:** Dye-sensitized solar cell (DSSC), Natural dyes, Electrochemical impedance Spectroscopy, Red tea extract